

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a

informatiky

Katedra elektroniky

**TEPLOTNÍ ČIDLA
THERMOSENSORS**

2009

Kamil Gomola

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě 7.5.2009

.....
Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D., za cenné připomínky, vstřícnou spolupráci a trpělivost.

Abstrakt

V této bakalářské práci jsou zpracovány fyzikální principy senzorů teploty a podle těchto principů jsou pak senzory rozděleny do jednotlivých kapitol jako jsou odporové kovové a polovodičové, termoelektrické, dilatační a bezdotykové senzory.

Praktická část obsahuje měření na třech typech senzorů nejpoužívanějších v elektrotechnice -termistor, platinový odpor a diodový PN senzor. Jsou zde uvedeny změřené charakteristiky v závislosti na teplotě, vypočtené hodnoty a konstanty, chyby a katalogové hodnoty.

V závěru jsou porovnány a zhodnoceny výsledky měření senzorů teploty.

Klíčová slova

teplota, senzor teploty, platinový odpor, termistor, diodový PN senzor, termočlánek, teploměr, bimetal, termovize

Abstract

This bachelors project is about the physical principals of temperature sensors and by following these principals the sensors can be divided into the individual categories which are resistance metallic and semiconductors, thermoelectric, dilatation and contactless sensors.

The practical part consists of measuring with three types of sensors that are most common in electrical engineering - thermistor, platonic resistance and diode PN sensor. You will find their measuring characteristics depend on temperature, calculated values and parameters, faults and catalogue values.

In conclusion the results of temperature sensor measurement values can be compared.

Key words

temperature, sensor temperature, platonic resistance, thermistor, diode PN sensor, thermoelectric, thermometer, bimetal, infra-red camera

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	konstanta měřeného termistoru ($7,81 \cdot 10^{-3} \Omega$)
B	teplotní konstanta měřeného termistoru (4200 K)
I	měřicí proud
I_F	proud v propustném směru
K	citlivost senzoru
NTC	negastor
PTC	pozistor
R_0	odpor při 0 °C
R_1	počáteční odpor
R_{25}	odpor při 25 °C
R_{100}	odpor při 100 °C
R_A	vypočtený odpor při teplotním součiniteli odporu α_1
R_B	vypočtený odpor při teplotním součiniteli odporu α_2
R_S	skutečná hodnota odporu (katalogová hodnota odporu)
P	ztrátový výkon
T	termodynamická teplota
ΔT	rozdíl termodynamických teplot
T_{25}	termodynamická teplota ($T = 298,15 \text{ K}$)
U	termoelektrické napětí generované termočlánkem
U_S	skutečná hodnota napětí (katalogová hodnota napětí)
U_R	průrazné závěrné napětí
V	konečný objem kapaliny
V_1	počáteční objem kapaliny
W_{100}	poměr odporů při teplotě 100 °C a 0 °C
f_m	mezní frekvence
l	konečná délka tělesa
l_1	počáteční délka tělesa
t	teplota v Celsiově stupnici
α	teplotní součinitel odporu, teplotní součinitel délkové roztažnosti
α_{12}	termoelektrický koeficient
β	teplotní součinitel objemové roztažnosti
Δ	absolutní chyba
δ	relativní chyba

Obsah:

1	úvod	7
2	základní pojmy z oboru měření teplot	8
2.1	teplota	8
2.2	teplotní stupnice	8
2.2.1	termodynamická teplotní stupnice	8
2.2.2	celsiova teplotní stupnice	8
2.2.3	fahrenheitova teplotní stupnice	9
2.3	senzor teploty	9
2.4	chyby měření	9
2.5	přechodové charakteristiky senzorů teploty	10
3	kovové odporové senzory teploty	10
3.1	odporové platinové snímače teploty	11
3.2	odporové niklové snímače teploty	11
3.3	odporové měděné snímače teploty	12
3.4	měřicí obvody pro kovové odporové snímače teploty	12
3.4.1	vliv měřicího proudu	12
3.4.2	vliv odporu vedení	12
3.4.3	linearizace statické charakteristiky kovového odporového snímače	13
3.5	konstrukce odporových kovových snímačů teploty	13
4	polovodičové odporové senzory teploty	14
4.1	NTC termistory	15
4.1.1	základní vlastnosti termistorů NTC	16
4.2	PTC termistory	16
4.3	polovodičové monokrystalické senzory teploty	17
4.4.1	monokrystalické Si senzory	17
4.4.2	senzor SiC	18
5	monolitické PN senzory	18
5.1	diodové	18
5.2	tranzistorové PN senzory teploty	19
5.3	monolitické integrované PN senzory teploty	19
6	termoelektrické články	19
6.1	seebeckův jev	19
6.2	názvosloví termoelektrických článků a souvisejících částí měřicího řetězce	20
6.3	termoelektrická pravidla	20
6.4	typy termoelektrických článků	21
7	dilatační teploměry	22

7.1	tyčové teploměry	22
7.2	bimetalické (dvojkovové) teploměry	22
7.3	bimateriálová (dvojmateriálová) čidla	23
7.4	skleněné teploměry	23
7.5	kapalinové tlakové teploměry	23
7.6	parní tlakové teploměry	23
7.7	plynové tlakové teploměry	24
8	indikátory teploty	24
9	zabudování dotykových teploměrů	24
10	bezdotykové měření teploty	24
10.1	tepelné detektory infračerveného záření	25
10.2	kvantové detektory infračerveného záření	26
10.3	termovize	26
11	měření teplotních závislostí diody, termistoru a Pt100	27
12	závěr	36
13	seznam použité literatury	37

1 ÚVOD

Teplota je jedna z nejdůležitějších termodynamických vlastností, které určují stav hmoty a objevuje se v mnoha fyzikálních zákonech. Existuje jen velmi málo vlastností, které by nebyly na teplotě závislé. Ve své podstatě je teplota mírou kinetické energie pohybu molekul a atomů, přičemž molekuly na sebe navzájem narážejí a rychlost jejich pohybu se stále mění v čase. V pevném skupenství molekuly neuspořádaně kmitají kolem rovnovážné polohy, v tekutém skupenství je pohyb molekul neuspořádaný v celém objemu. Pokud na hmotu nepůsobí okolní prostředí, průměrná rychlost pohybu molekul je konstantní. Tato průměrná rychlost je závislá na teplotě a termodynamická teplota libovolného tělesa je přímo úměrná kinetické energii molekul neboli přímo úměrná jejich hmotnosti a kvadrátu rychlosti pohybu. Za nejnížší teplotu se pokládá absolutní teplotní nula neboli nula termodynamické stupnice (0K), během níž veškerý pohyb ustává. Pro stanovení teploty se používají teplotní závislosti jiných fyzikálních veličin. Volí se takové fyzikální jevy, u nichž lze závislost matematicky vyjádřit teplotní stupnicí. Historie teploměru začíná vynálezem italského fyzika, astronoma, matematika a filozofa Galilea Galilei roku 1592. Jeho málo přesný (na atmosférickém tlaku závislý) teploměr byl založený na teplotní roztažnosti vzduchu. Roku 1724 přichází německý fyzik Daniel G. Fahrenheit již s moderním rtuťovým teploměrem a s první teplotní stupnicí. Od té doby se vývoj teploměrů nezastavil. Roku 1730 navrhuje francouzský přírodovědec René-Antoine Ferchault de Réaumur svoji stupnici a dále pak v roce 1742 švédský astronom Anders Celsius zavádí Celsiovu stupnici a konečně roku 1848 britský fyzik lord William Thomson Kelvin zavedl termodynamickou stupnici (někdy také označovanou Kelvinovu stupnici). Znalost teploty je nutná ve všech oblastech lidské činnosti. Jednou z prvních aplikací teploměru byl lékařský teploměr (vynalezen roku 1866). Diagnostika ale není jen lékařská disciplína, ale také základní prostředek ke zjišťování technického stavu neživých objektů. Základem bezpečnosti spolehlivosti v energetice, v letecké, železniční a automobilové dopravě a ve veškeré průmyslové produkci elektrospotřebičů, výpočetní a telekomunikační techniky je technická diagnostika, přičemž měření teploty patří mezi základní diagnostické veličiny. V poslední době již například jezdí expresní vlaky, u nichž se monitoruje teplota všech ložisek během jízdy. Samozřejmě nelze opomenout měření teploty v potravinářské, chemické, farmaceutické výrobě. Potřeba přesného měření teplot v metalurgii je dána především vysokými požadavky na kvalitu odlitků, které lze docílit pouze přesným dodržováním technologických předpisů, v nichž znalost teploty a dalších fyzikálních a chemických vlastností taveniny hraje nemalou úlohu. Měření a regulace teploty jsou základem pro zajištění hospodárného vytápění a současně tepelné pohody obytných a pracovních prostor. Každý měřicí přístroj nebo měřicí systém pro měření libovolné fyzikální veličiny má stanovený rozsah teploty, v němž je zajištěna mezní hodnota chyby přístroje nebo je stanovena změna údaje měřené veličiny vyvolaná teplotou. Současný trend v teplotních senzorech spočívá v širším využití mikroelektronických technologií jako např. v impedanci polovodičových čidel teploty na jediný čip s analogovými číslicovými obvody umožňující připojení senzoru k signálovým sběrnicím, ve vývoji nových typů detektorů tepelného

záření, v integraci teplotních čidel do inteligentních (tzv. smart) senzorů libovolných fyzikálních veličin pro automatickou korekci odchylek parametrů způsobených kolísáním provozních teplot. [1]

2 ZÁKLADNÍ POJMY Z OBORU MĚŘENÍ TEPLOT

2.1 Teplota

Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy tj. stav kdy je v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimž je stav soustavy popsán nezávisí na čase. Stav termodynamické rovnováhy bývá charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Fyzikální veličina teplota se nesmí zaměňovat za fyzikální veličinu teplo, neboť teplo je forma energie související s pohybem částic dané soustavy těles, ale není stavovou veličinou, neboť závisí na přítomném stavu soustavy, ale na celé minulosti vývoje této soustavy. Teplota je jedna z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy měření nepřímé. [1]

2.2 Teplotní stupnice

2.2.1 Termodynamická teplotní stupnice

Měříme ji teploměrem s termodynamickou stupnicí, která je v současné době základní teplotní stupnicí. Počátek termodynamické stupnice je dán termodynamickou absolutní nulou. Základní jednotkou termodynamické stupnice je kelvin (K). Kelvin je definován zvolením termodynamické teploty trojného bodu vody, tj. rovnovážného stavu tří skupenství vody (ledu, vody a syté páry) jako referenčního a dobře reprodukovatelného teplotního bodu termodynamické stupnice a přiřazením hodnoty termodynamické teploty trojného bodu na pevně stanovenou hodnotu $T=273,16$ K. Jeden kelvin je 273,16 díl termodynamické teploty trojného bodu vody.

2.2.2 Celsiova teplotní stupnice

Celsiova (teplotní) stupnice je odvozena od Kelvinovy termodynamické stupnice posunutím o teplotu 273,15 K, což je hodnota o 0,01 K nižší než termodynamická teplota trojného bodu vody. Jednotkou Celsiovy stupnice je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$). Celsiova teplota t je rovná rozdílu termodynamické teploty T a teploty 273,15 K neboli platí $t (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15$ K

dále pro teplotní rozdíl platí: $\Delta t = \Delta T$

2.3.3 Fahrenheitova teplotní stupnice

Fahrenheitova teplotní stupnice byla vytvořena v 18. století. Původem německý fyzik žijící v Polsku a později v Nizozemsku Daniel Gabriel Fahrenheit sestrojil svůj rtuťový teploměr (v té době poměrně neobvyklé, užíval se především líh) a snažil se najít vhodnou teplotní stupnici. Zvolil si tedy jako určující body 0 °F (-18°C) pro teplotu směsi ledu, vody a chloridu amonného a 96 °F pro teplotu lidského těla. Stupnice byla později po získání nových poznatků ještě poopravena. [3] Používá v některých státech. Pro převod na Fahrenheitovu teplotu platí:

$$t(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{2} T - 459,67 = \frac{9}{2} t - 32$$

2.3 Senzor teploty

Senzor teploty je funkční prvek tvoří vstupní blok měřicího řetězce tj. blok, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Pojem senzor teploty je ekvivalentní pojmu snímač teploty (samostatná konstrukční součást teploměrového zařízení, která obsahuje teplotní čidlo), ale také pojmu čidlo teploty (část snímače převádějící teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu). Stejně tak se jako senzor označuje jako detektor tepelného záření nebo teploměr (zařízení k měření teploty). Podle fyzikálního principu se senzory teploty dělí na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, a na další jako jsou např. kapacitní, aerodynamické. Podle styku s měřeným prostředím se senzory teploty dělí na dotykové a bezdotykové. Podle transformace signálu se senzory teploty dělí na aktivní, které působením teploty chovají jako zdroj elektrické energie (termoelektrické články) a na pasivní, u kterých je s výjimkou chemických indikátorů teplot nutné elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu, neboť měření teploty je vždy měřením nepřímým. [1]

2.4 Chyby měření

Chyby systematické- soustavné, způsobené stárnutím a nepřesností jednotlivých částí měřicího řetězce, měřicí metodou a chybou pozorovatele a byly obvykle alespoň částečně odstranitelné korekcí, kompenzací.

Chyby náhodné-chyby náhodné (chyby časově nahodile proměnné jak ve velikosti tak ve znaménku).

Chyby hrubé-chyby obvykle způsobené závadou na některé části měřicího řetězce, nevhodnou měřicí jednotkou nepozorností obsluhy apod.

Absolutní chyba je dána rozdílem mezi naměřenou a skutečnou hodnotou (správnou hodnotou)

$$\Delta = R - R_s [\Omega]$$

Relativní chyba je dána podílem absolutní chyby a skutečné hodnoty (správné hodnoty)

$$\delta = \frac{\Delta}{R_s} \cdot 100[\%]$$

2.5 Přechodová charakteristika senzorů teploty

U reálného senzoru není nikdy tepelná vodivost nekonečně velká a proto bude přechodová charakteristika vyššího řádu. Časová konstanta τ je čas, za který odezva na skokovou změnu dosáhne 63,2 % ustálené hodnoty. Za čas $t = 4,606 \tau$ dosáhne odezva hodnoty 99,0 % a za $6,909 \tau$ dosáhne odezva 99,99 %. U většiny senzorů je přechodová charakteristika 2 a 3. řádu. Přechodové charakteristiky 2. řádu lze aproximovat charakteristikou 1. řádu nebo dopravním zpožděním a charakteristikou prvního řádu. Výrobci senzorů udávají buď časovou konstantu τ nebo tzv. dobu odezvy, tj. čas za který odezva dosáhne hodnoty buď 90 % nebo 95 % ustálené hodnoty.

3 KOVOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty

Atomy krystalové mřížky kovu s rostoucí teplotou zvyšují amplitudu svých kmitů a kladou tak větší odpor průchodu elektronů.

Teplotní závislost odporu na teplotě se počítá ze vztahu

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$$

R_0 odpor při 0 °C

α teplotní součinitel odporu

ΔT rozdíl teplot

Látka	$\alpha [10^{-3} \text{K}^{-1}]$
konstantan	0,05
rtuť	1
stříbro	4,1
měď	4,3
hliník	4,4
wolfram	4,5
železo	6,5
křemík	-70

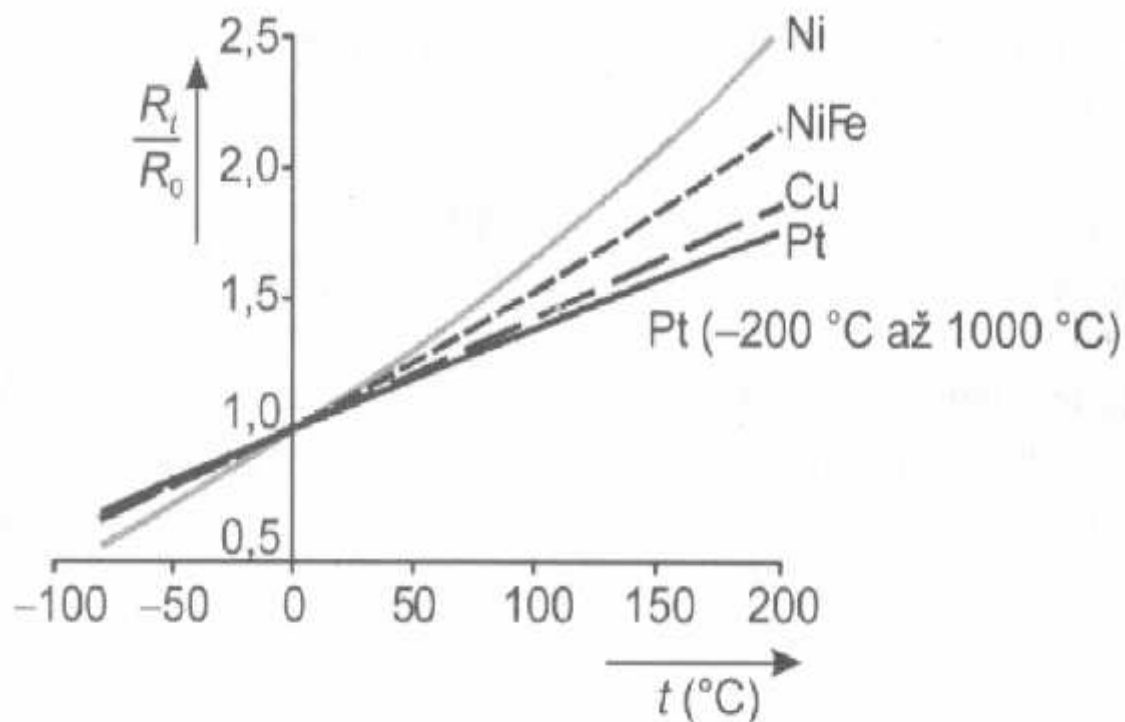
Dalším parametrem odporových snímačů je poměr odporu čidla R_{100} při teplotě 100 °C a R_0 při teplotě 0 °C. Tento poměr označujeme písmenem W podle vztahu

$$W = \frac{R_{100}}{R_0}$$

Pro větší rozsahy teplot, již lineární vztahy nelze použít. Z materiálů vhodných pro realizaci odporových kovových senzorů jsou nejrozšířenější platina, nikl, balco (Ni-Fe), měď, molybden a pro extrémně nízké teploty od 0,5 K slitiny Rh-Fe, Pt-Co.

Materiály používané pro kovové snímače teploty

materiál	$\alpha [10^{-2} \text{K}^{-1}]$	teplotní rozsah	poměr odporů W_{100}
platina	0,385 až 0,391	-200 až +1000	1,3850
nikl	0,617 až 0,675	-70 až +200	1,6180
Ni-Fe	0,518 až 0,527	-100 až +200	1,462
měď	0,426 až 0,433	-50 až +150	1,4260



Obr. 1 Teplotní závislost odporových kovových snímačů

3.1 Odporové platinové snímače teploty

Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Pro čistotu platiny u provozních snímačů teploty (Pt100) je normou IEC-751 předepsán poměr elektrického odporu $W_{100} = 1,385$.

Pro metrologické účely jsou nároky na čistotu platiny vyšší (čistota 99,999 %). Pro posouzení čistoty se vyhodnocuje poměr odporů při bodě tání galia a trojném bodu vody. Platinové měřicí odpory pro průmyslové použití se dělí do dvou tolerančních tříd. Třída A je stanovena pro rozsah teploty od -200 °C do 650 °C a třída B pro rozsah teploty od -200 °C do 850 °C. Vyrábějí se i vysokoteplotní snímače do teploty 1100 °C. Dlouhodobá stabilita je u provozních Pt snímačů kolem $0,05$ % / 1000 h. Kromě základní hodnoty odporu $R_0 = 100$ Ω se vyrábějí snímače se základní hodnotou odporu 50 , 200 , 500 , 1000 , a 2000 Ω . [1]

Závislost odporu platinového teploměru na teplotě lze vyjádřit vztahem

$$R = R_0 \cdot \left(1 + 3,90802 \cdot 10^{-3} t - 5,80195 \cdot 10^{-7} \cdot t^2\right)$$

3.2 Odporové niklové snímače teploty

Niklová čidla teploty jsou většinou vyráběny tenkovrstvou technologií. Výhodou niklových snímačů je velká citlivost, rychlá odezva tj. malá časová konstanta a malé rozměry. Nevýhodou je omezený teplotní rozsah a vůči platině značná nelinearita, horší dlouhodobá stabilita a odolnost vůči působení

prostředí. Podobně jako platinová čidla se kromě základní hodnoty odporu $R_{100} = 100 \, \Omega$ vyrábějí snímače se základní hodnotou odporu 200, 500, 1000 a 2000 Ω . [1]

Závislost odporu niklového teploměru na teplotě lze vyjádřit vztahem

$$R = R_0 \cdot \left(1 + 5,485 \cdot 10^{-3} t + 6,65 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 2,805 \cdot 10^{-11} \cdot t^4 + 2 \cdot 10^{-17} \cdot t^6 \right)$$

3.3 Odporové měděné snímače teploty

Měď se používá v teplotním rozsahu od $-200 \, ^\circ\text{C}$ do $+200 \, ^\circ\text{C}$. Pro závislost odporu měděného čidla na teplotě lze v rozsahu teplot od $-50 \, ^\circ\text{C}$ do $+150 \, ^\circ\text{C}$ lze použít lineární vztah

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad \alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \, \text{K}^{-1}$$

Vzhledem k malé rezistivitě mědi (6 krát menší než u platiny) a snadné oxidaci mědi se měděné snímače teploty běžně nevyrábějí. Výhodnou aplikací teplotní závislosti mědi je např. přímé měření teploty měděného vinutí elektrických strojů prostřednictvím měření odporu vinutí (samozřejmě při vypnutém napájení motoru). [1]

3.4 Měřicí obvody pro kovové odporové snímače teploty

Na měřicí obvody jsou kladeny tyto požadavky:

- minimalizace vlivu měřicího proudu procházejícího čidlem
- minimální časová konstanta
- minimální vliv odporu vedení k měřicímu obvodu
- linearizace (analogová nebo číslicová) závislosti odporu snímače na teplotě

3.4.1 Vliv měřicího proudu

Elektrický ztrátový výkon P na měřicím odporu je dán součinem

$$P = R \cdot I^2$$

kde I je měřicí proud, který ohřívá měřicí odpor. Běžná hodnota měřicího proudu je od 0,3 mA do 1 mA.

3.4.2 Vliv odporu vedení

Klasickým obvodem pro vyhodnocení je Wheatstoneův můstek. Třívodičové můstkové zapojení systematickou odchylku teplotní závislosti odporu vedení zmenší, ale zcela neodstraní. Odpor vedení se mění současně ve dvou větvích můstku, čímž teplotní vliv kompenzuje, ale jen při vyváženém můstku. Třívodičové uspořádání vývodů měřicího odporu se často používá při proudovém napájení snímačů, kdy při volbě vyšší základní hodnoty měřicího odporu ($>500 \, \Omega$) je vliv kolísání odporu vedení již zanedbatelný. Existuje také tzv. aktivní můstek, kde odporová síť operačního zesilovače zajišťuje proudové napájení snímače teploty.

V současné době se stále častěji využívá úprava výstupního signálu přímo v hlavici snímače, protože přenos nízkonapětových signálů je ovlivňováno rušením. Proto je měřicí řetězec koncipován tak, že na

výstupu je buď zesílený analogový proudový signál (4 až 20 mA), nebo číslicový signál podle vybrané průmyslové komunikační sběrnice (např. HART, CAN, Profibus).

3.4.3 Linearizace statické charakteristiky kovového odporového snímače teploty

se provádí použitím inverzních polynomů pro programové vybavení měřících systémů. Kromě číslicového způsobu existují také analogové způsoby linearizace.

3.5 Konstrukce odporových kovových snímačů teploty

Čidlo odporového kovového snímače teploty, které označujeme podle názvosloví z oboru měření teplot ČSN 25 8005 jako měřící odpor, tvoří základní konstrukční část odporového snímače teploty.

Měřící odpor se vyrábí

- drátovou technologií
- tenkovrstvou technologií
- tlustovrstvou technologií

Drátový měřící odpor je tvořen stočeným platinovým drátkem (průměr od 0,007 mm do 0,05 mm), fixovaným do keramiky (ve válcových kapilárách keramických tělísek) nebo je bifilárně navinuto na keramickém či skleněném tělísku a zataveno do skla. Měřící odpor je obvykle uložen v ochranné (obvykle kovové) trubici (v některých konstrukcích je označován jako stonek). Kromě spirálového uspořádání drátku se pro rozsah do 150 °C vyrábějí snímače s platinovým drátkem navinutým na pertinaxové nebo slídové podložce nebo tenkovrstvou technologií, tj. technikou napařování a iontovým leptáním na podložce Al_2O_3 (korundová keramika). Jmenovitý odpor se u napařovaných čidel přesně nastavuje nízkovýkonovým laserem. Teplotní délková roztažnost platiny se liší od teplotní roztažnosti výše uvedených izolačních materiálů a protože se platinový drátek nebo film dotýkají izolátoru, dochází k systematické odchylce způsobené relativními délkovými změnami obou materiálů. U průmyslových měřících odporů dosahuje chyba při teplotách nad 400 °C hodnoty až $\pm 0,25$ °C. Pro metrologické účely se nejlepší stability docílí volným uložením platinové cívečky ve vzduchu nebo ve směsi helia a kyslíku. Přímý styk atmosféry způsobuje vlivem vodíku a oxidu uhličitého nárůst chyby měření. Odporové snímače teploty se standardní hlavicí typu B dle DIN 43729 jsou vybaveny výměnnou měřící vložkou s jedním až třemi měřícími odpory. Obvykle jsou tam umístěny převodníky na proudový výstupní signál (4 až 20) mA, případně programovatelné převodníky, umožňující číslicovou linearizaci a komunikaci s řídicími systémy např. prostřednictvím protokolu HART. Pro mechanicky náročné aplikace je vnitřní stonek ohebný. Stejně jako u termoelektrických snímačů se odporové snímače vyrábějí v provedení:

- odporové snímače teploty do jímky
- odporové snímače teploty s jímkou
- odporové snímače teploty bez jímky
- odporové snímače teploty tyčové



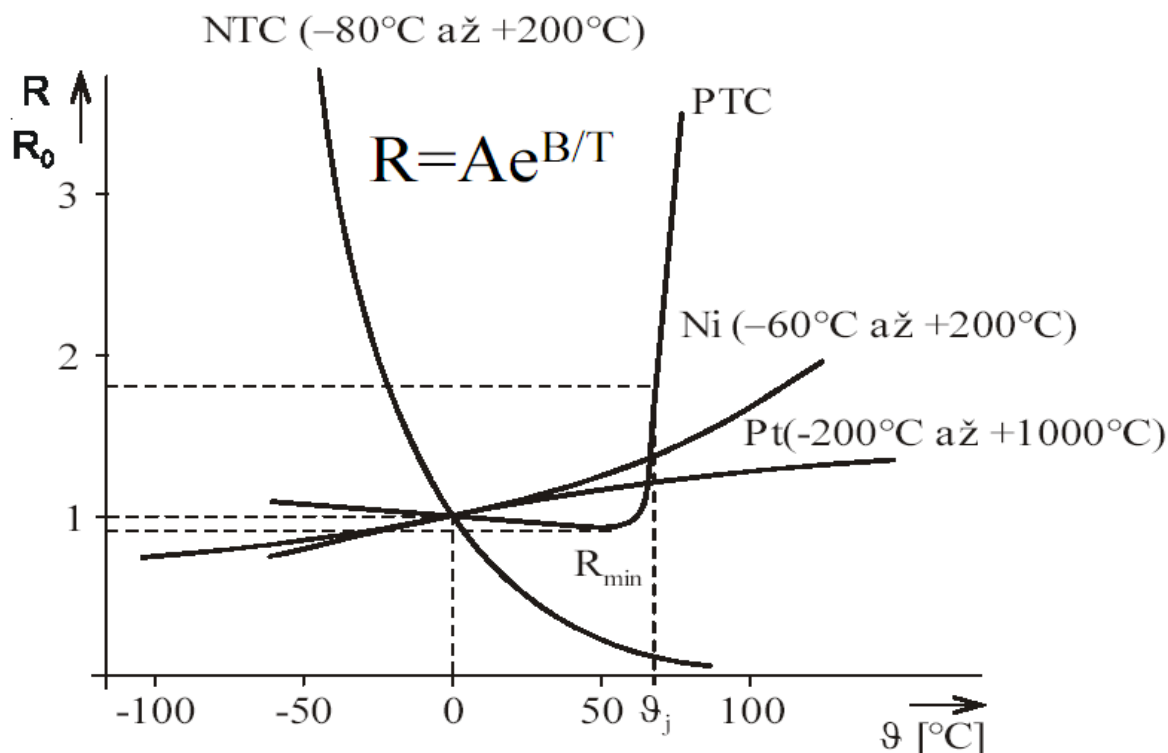
Obr. 2 Konstrukce odporových kovových snímačů teploty

4 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty

U polovodičových senzorů teploty se podobně jako u kovových využívá teplotní závislosti odporu na teplotě. Na rozdíl od kovů je ale princip vodivosti polovodičů odlišný, a proto jsou jiné i vlastnosti těchto senzorů. Vedení proudu v kovech zajišťují valenční elektrony, které jsou k jádru vázány velice slabě a vytváří tzv. elektronový plyn. S rostoucí teplotou se zvyšuje amplituda kmitů jednotlivých atomů, které tak znesnadňují elektronům průchod a zvyšují elektrický odpor materiálu. U polovodičů je tomu ovšem jinak. Při teplotě absolutní nuly jsou všechny elektrony pevně vázány ke svým jádrům a materiál nemůže vést proud. Elektronům je třeba dodat určitou energii k tomu, aby „přeskočily“ přes tzv. zakázaný pás do pásu vodivostního a mohly se účastnit vedení proudu. Touto energií může být např. energie elektromagnetického pole nebo energie tepelná. S rostoucí teplotou tedy bude koncentrace nosičů náboje růst a elektrický odpor materiálu se bude snižovat. Zatímco se tento jev snažíme u klasických polovodičových součástek potlačit, u termistorů se ho naopak snažíme vhodnou technologií a složením zvýraznit. [2]

Polovodičové odporové senzory teploty dělíme na

- Termistory
 - NTC (negastory)
 - PTC (pozistory)
- Monokrystalické odporové senzory



Obr. 3 Porovnání teplotní závislosti termistorů NTC a PTC s kovovými odporovými senzory

4.1 NTC TERMISTORY

NTC termistory patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v elektrotechnice.

Již podle názvu mají termistory NTC (Negative Temperature Coefficient) záporný teplotní součinitel odporu, což odpovídá výše zmíněnému jevu. S rostoucí teplotou se zvyšuje koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor klesá. Polykrystalické NTC termistory se vyrábí práškovou technologií spékáním oxidů Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO , MnO , NiO , CoO , BaO apod. Kromě termistorů pro běžné teplotní rozsahy - 50°C až 150°C se vyrábí i speciální termistory pro nízké (od cca 4 K) a vysoké teploty (zhruba do 1000°C).

Termistory NTC se vyrábějí práškovou, tenkovrstvou nebo tlustovrstvou technologií. V prvním případě se senzory vyrábí ze směsi oxidů kovů (např. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{MnO} + \text{CoO}$ apod.) a vylisované se pak zpevňují slinováním za vysokých teplot. Příkladem tenkovrstvého NTC senzoru může být negastor SiC pro rozsah teplot -100°C až $+450^\circ\text{C}$, vyráběný vysokofrekvenčním napařováním na substrát Al_2O_3 s B $\hat{=}$ $\langle 1600, 3400 \rangle$ a základní hodnotou odporu při teplotě 25°C od $10\text{ k}\Omega$ do $1\text{ M}\Omega$, nebo miniaturní negastor z polykrystalického křemíku dopovaného bórem. Tlustovrstvé senzory vznikají nanášením speciálních past a následným vypálením. U cermetových NTC termistorových past tvoří funkční materiál polovodičová polykrystalická keramika na bázi přesně řízených směsí některých kovových oxidů (Mn, Co, Ni, Cu, Zn). Jako nosný substrát NTC cermetových vrstev se obvykle používá korundová keramika (96% Al_2O_3). Mimo cermetových existují i polymerní NTC pasty na bázi

uhlíku. Pro účely měření se nejčastěji používají perličkové termistory ve skleněném držáku s průměrem perličky 0,2 až 3 mm. [2]



Obr. 4 NTC termistor

Závislost odporu termistoru na teplotě je silně nelineární a lze ji vyjádřit přibližným vztahem

$$R = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

A [Ω] je konstanta závislá na materiálu termistoru a geometrickém tvaru

$$A = R \cdot e^{-\frac{B}{T}}$$

Konstanta A se v katalogích neuvádí, termistor bývá charakterizován svou citlivostí B a odporem R_{25} při teplotě T_{25} . Obvykle se uvádí odpor při teplotě 25 °C. Vztah je proto vhodné přepsat do tvaru

$$R = R_{25} \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}} \right)}$$

B je teplotní konstanta daná materiálem termistoru

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2}$$

Konstanta B , která není tak úplně konstantou, neboť je teplotně závislá, se vyhodnotí z měření, která dle doporučení DIN provádíme při teplotách $T_1=291,15$ K (18 °C) a $T_2=358,15$ K (85 °C).

Mění-li se teplota pouze v malém rozmezí v okolí pracovní teploty T_1 , můžeme charakteristiku NTC termistoru linearizovat podle vztahu

$$R = R_1 \cdot (1 - \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\alpha = -\frac{B}{T_1^2}$$

Vzhledem k silně nelineárnímu průběhu závislosti NTC termistoru na teplotě jsou možnosti použití tohoto univerzálního vztahu omezené.

4.1.1 Základní vlastnosti termistorů NTC

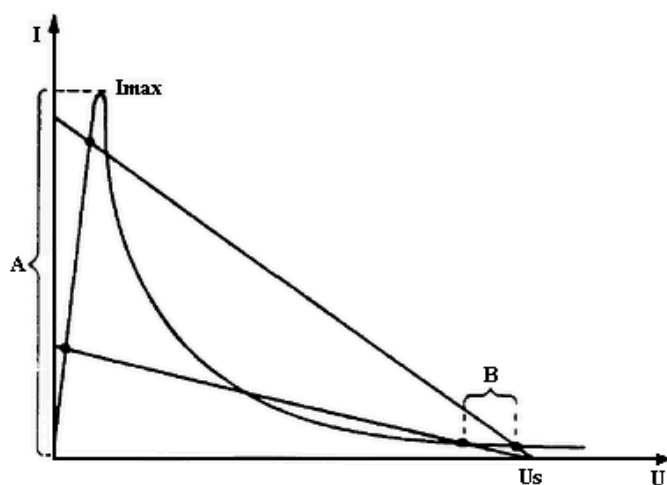
- Teplotní součinitel odporu je záporný a zhruba o řád vyšší než u kovů (obvykle nabývá hodnot $-0,03$ K⁻¹ až $-0,06$ K⁻¹).

- Běžný rozsah teplot je $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (méně často $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, výjimečně do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Široké rozmezí hodnot odporu (od $0,1\text{ }\Omega$ až několik $\text{M}\Omega$), oproti platinovým senzorům mají obvykle mnohem větší odpor a větší citlivost, což přináší méně problémů v souvislosti s teplotně závislými přírůdky.
- Velká citlivost, malá hmotnost a rozměry umožňují měřit i velmi rychlé teplotní změny.
- V porovnání s platinovými senzory jsou NTC termistory méně stabilní a časově nestálé.
- Zásadní nevýhodou je značná nelinearita.

4.2 PTC TERMISTORY

s rostoucí teplotou roste odpor, přičemž roste mnohem rychleji než u kovů. Vyrábějí se z polykrytalické feroelektrické keramiky, např. z titančitanu barnatého (BaTiO_3). Odpor pozistoru se stoupající teplotou nejprve mírně klesá. Teplotní součinitel v této oblasti je kolem $1\text{ }\%\text{ K}^{-1}$. Od tzv. Curieovy teploty dochází u pozistoru ke strmému nárůstu rezistivity materiálu. Po nárůstu o několik řádů pak hodnota odporu opět mírně klesá. Základním parametrem pozistoru je spínací teplota t_s . Spínací teplotu t_s lze chemickým složením materiálu zvolit od $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kromě standardní technologie se dále vyrábějí pozistory dopované křemíkem, jejichž pracovní část charakteristiky je přibližně lineární. Využití pozistorů je v elektrických obvodech ve funkci omezovače proudu, tepelné ochrany a teplotní regulace.

Vratné pojistky – protéká-li termistorem příliš velký proud, který způsobí ohřátí pozistoru natolik, že dojde k překročení teploty t_s , její odpor strmě narůstá. Obvod musí být navržen tak, aby se při povolených dlouhodobých proudech vznikající teplo rozptýlilo do okolí. Funkce vratné pojistky plyne z voltampérové charakteristiky pozistoru. Oblast A reprezentuje pracovní oblast, povolený rozsah proudu. Překročí-li proud hodnotu I_{max} , termistor se zahřeje natolik, že dojde prudkému nárůstu odporu a tím i k poklesu proudu. [2]



Obr. 5 Voltampérová charakteristika PTC termistoru

4.3 Polovodičové monokrystalické senzory teploty

4.3.1 Monokrystalické Si senzory

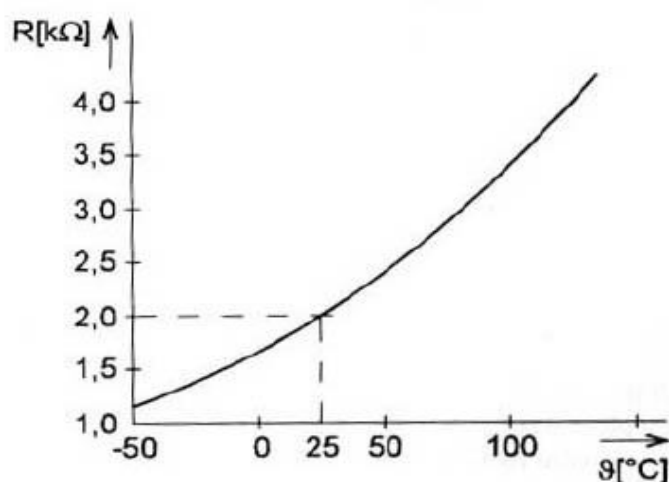
Senzor je založen na nevlastní polovodiči typu N, s dominantní elektronovou vodivostí.

Monokrystalické senzory teploty lze zhotovit z křemíku, germania, india, včetně jejich slitin.

V průmyslové praxi se sériově vyrábí Si senzor k měření teploty v rozsahu od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

S rostoucí teplotou dochází vlivem rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče ke zmenšování pohyblivosti těchto nosičů, v důsledku čehož narůstá rezistivita, podobně jako je tomu u kovů.

V řadě aplikací mohou díky svým vlastnostem nahradit platinová čidla, je však nutno počítat s linearizačními obvody. [1]



Obr. 6 Závislost odporu na teplotě Si senzoru

Teplotní závislost Si senzoru pro teplotní rozsah $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ je

$$R = R_{25} \cdot \left(1 + 7,88 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t + 1,937 \cdot 10^{-5} \Delta t^2\right)$$

kde $\Delta t = t - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

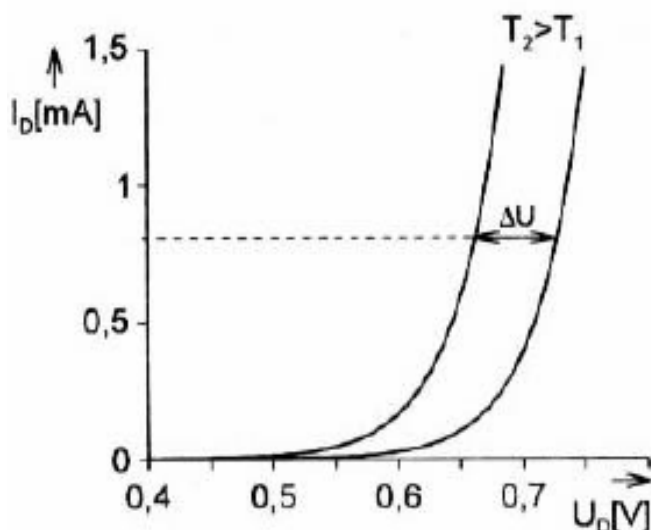
4.3.1 Senzor SiC

Pro větší rozsah teplot od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ lze použít senzor SiC. Senzor se vyrábí tenkovrstvou technologií vysokofrekvenčním napařováním na substrát Al_2O_3 . Charakteristika odpovídá negatorům.

5 MONOLITICKÉ PN SENZORY

5.1 Diodové PN senzory

Integrované monolitické senzory teploty jsou nejčastěji založeny na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Tyto senzory mají teplotní rozsah od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nejistotu měření v rozsahu 0,6 % až 2 %. Jako senzor lze kromě Si diod použít další polovodičové struktury jako např. galium-arsenid.



Obr. 7 Teplotní závislost charakteristiky přechodu PN diody

5.2 Tranzistorové PN senzory teploty

Tranzistorové PN senzory jsou založeny na obdobném principu jako PN diody, tj. využívá se teplotní závislost napětí přechodu báze-emitor v propustném směru. Báze a kolektor jsou spojeny.

5.3 Monolitické integrované PN senzory teploty

U integrovaných senzorů teploty tvoří vlastní sensor teploty a elektronický obvod jediný monolitický prvek. Nejčastěji jsou založeny na dvojici bipolárních tranzistorů napájených ze zdrojů proudů. Výhodou tohoto diferenčního uspořádání je potlačení vlivu teplotní závislosti proudu a chyby způsobené oteplením polovodiče ztrátovým výkonem. Uspořádání se označuje jako PTAT (proportional to absolute temperature) obvody.

6 TERMOELEKTRICKÉ ČLÁNKY

6.1 Seebeckův jev

Termoelektrické články jsou založeny na Seebeckově jevu, tj. jevu převodu tepelné energie na elektrickou. Dotýkají-li se totiž dvě látky, které se liší svou výstupní prací a prostorovou hustotou elektronového plynu, přechází jedním směrem více elektronů než druhým. To, že je velikost kontaktního napětí ovlivněna i teplotou obou styčných ploch, objevil v roce 1821 Seebeck.

V uzavřeném obvodu realizovaném ze dvou materiálově různých vodičů nebo polovodičů protéká stejnosměrný elektrický proud tehdy, mají-li oba spoje rozdílnou teplotu.

$$U = \alpha_{12} \cdot \Delta T$$

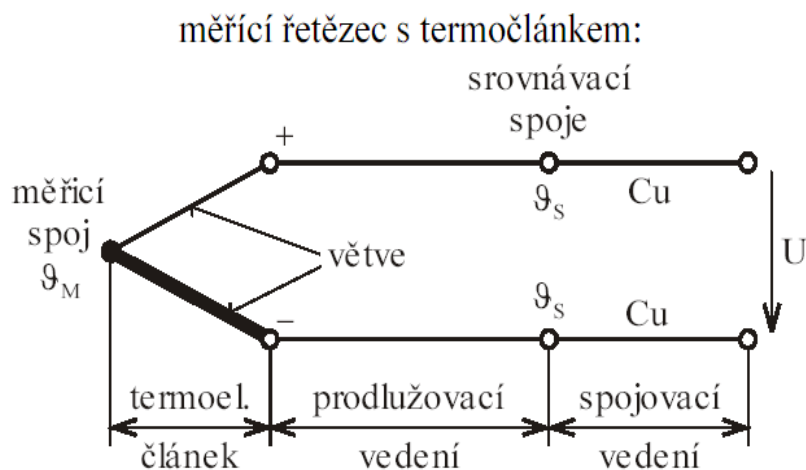
kde U je termoelektrické stejnosměrné napětí generované termočlánkem

α_{12} je termoelektrický koeficient, hodnota pro kovy je řádově (10^{-5} ; 10^{-6}) $V \cdot K^{-1}$, hodnota pro polovodiče je řádově (10^{-3} ; 10^{-5}) $V \cdot K^{-1}$

ΔT je rozdíl teplot na obou koncích obvodu

Termoelektrický koeficient není konstantní a jeho hodnota se změnou teploty mění. Ve všeobecném měřítku se na přesné určení závislosti termoelektrického napětí používá normalizační tabulka.

6.2 Názvosloví termoelektrických článků a souvisejících částí měřicího řetězce



Obr. 8 Termoelektrický článek

srovnávací teplota je teplota srovnávacího spoje

vztažná nebo také referenční teplota je teplota srovnávacích spojů ve funkci vztažných spojů, tj.

teplota použitá ke stanovení základních hodnot termoelektrického napětí

prodlužovací vedení je vedení ze stejných kovů jako je větve termoelektrického článku

kompenzační vedení je vedení z jiných kovů než jsou větve termoelektrického článku ze vzácných kovů, ale termoelektrický koeficient těchto materiálů musí v omezeném teplotním rozsahu být stejný jako u připojeného termoelektrického článku, tj. kompenzační vedení musí mít v daném omezeném teplotním rozsahu stejnou charakteristiku jako odpovídající termoelektrický článek.

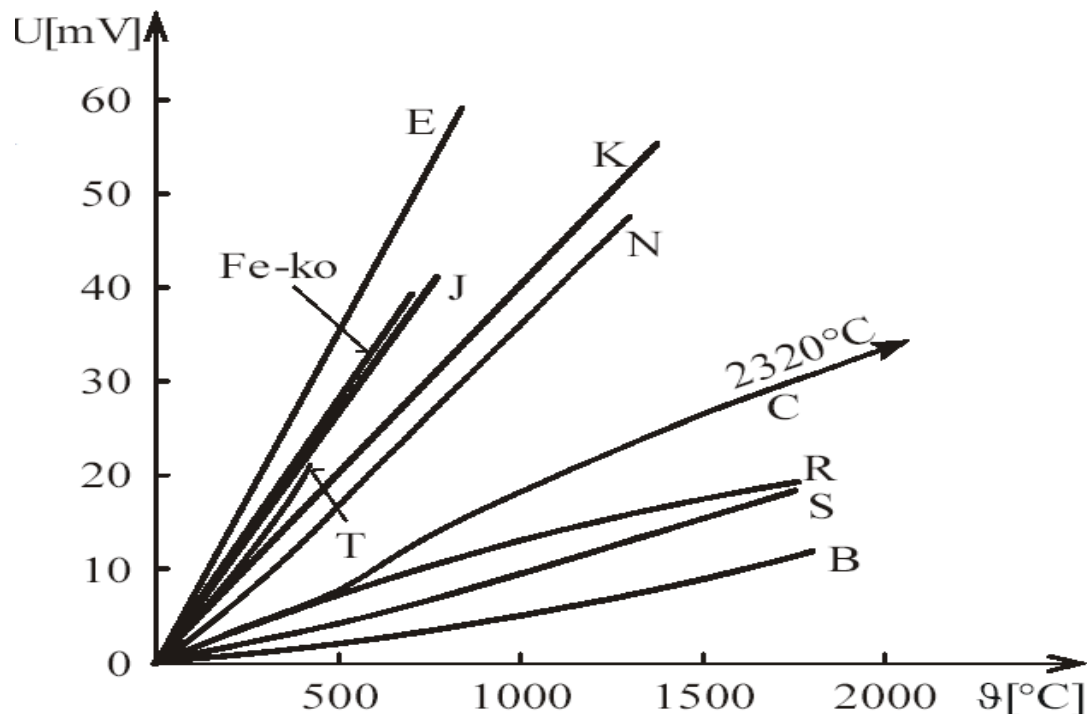
6.3 Termoelektrická pravidla

Termoelektrické napětí závisí na teplotách spojů dvou vodičů a nikoliv na rozložení teploty podél vodičů.

Termoelektrické napětí nezávisí na vložení dalších vodičů do obvodu termoelektrického článku.

Pokud není možné udržovat teplotu srovnávacích spojů termoelektrického článku na konstantní hodnotě, je možné uspořádání s dalším termoelektrickým článkem jehož vztažné spoje již budou v prostředí s konstantní teplotou. Toto uspořádání je využíváno u prodlužovacího vedení z termoelektrických materiálů.

6.4 Typy termoelektrických článků



Obr. 9 Charakteristiky termoelektrických článků

Vlastnosti a použitelnost termoelektrických článků:

Typ K: má složení NiCr-NiAl (chrom-alumen) je vhodný pro oxidační a inertní atmosféru, je necitlivý pro neutronový tok, není vhodný pro měření ve vakuu.

Typ T: má složení Cu-CuNi (měď-konstantan) je nejlepší článek pro nízké teploty kryogenní aplikace, v redukční, oxidační atmosféře a ve vakuu ho lze použít až do teploty 700 °C

Typ J: má složení Fe-CuNi (železo-konstantan) je vhodný pro oxidační, redukční i inertní atmosféru a vakuum.

Typ N: má složení NiCrSi-NiSiMg (nicrosil-nisil) má velmi stabilní charakteristiku až do 1300 °C, je vhodný pro cyklické změny teploty a dále je vhodný pro jadernou energetiku, neboť je odolný vůči neutronovému toku.

Typ E: má složení NiCr-CuNi (chromel-konstantan), má nejvyšší hodnotu termoelektrického koeficientu, dále je vhodný pro vakuum a středně oxidační atmosféru kde se dá využít bez ochranného krytí.

Typ R: má složení PtRh13-Pt je používán pro měření vysokých teplot až do 1780 °C je odolný vůči oxidaci a korozi, ale vždy musí být v ochranném provedení

Typ S: má složení PtRh10-Pt, jinak stejné jako u typu R

Typ B: má složení PtRh30-PtRh6 je použitelný až do teploty 100 °C (v rozsahu do 300 °C) má velmi malou citlivost), má obdobné vlastnosti jako typ R a S

Typ G: má složení W-WRh je vhodný pro extrémně vysoké teploty, obvykle se nepoužívá pro rozsahy teplot pod 400 °C, je chemicky stabilní a vhodný k použití jak v oxidační tak inertní atmosféře

Typ C: má složení WRh5.WRh26 má obdobné vlastnosti jako typ G

Provedení konstrukce se dělí na:

- izolované (nejdelší doba odezvy, odolný proti elektromagnetickému rušení)
- uzemněné
- otevřené (nejkradší doba odezvy od 0,015s)

7 DILATAČNÍ TEPLoměRY

Dilatační teploměry jsou založené na teplotní roztažnosti pevných látek, kapalin a plynů. Podle konstrukce se dilatační teploměry dělí na

- tyčové
- bimetalické (dvojkovové)
- bimateriálové (dvoj materiálové)
- skleněné
- kapalinové tlakové
- parní tlakové
- plynové tlakové

7.1 Tyčové teploměry

Tyčové teploměry jsou založeny na teplotní délkové roztažnosti dvou konstrukčních dílů z pevných látek, které jsou spolu spojeny v jediném místě. Čidlo tyčového teploměru je nejčastěji tvořeno trubicí délky l z kovu s velkým teplotním součinitelem délkové roztažnosti, uvnitř které je tyč z materiálu s malým teplotním součinitelem délkové roztažnosti (např. křemen, uhlík).

Pro výpočet délky tělesa l při teplotní délkové roztažnosti α se počítá ze vztahu

$$l = l_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Tyčové teploměry se používají hlavně v termostatech jako snímače dvoupolohových regulátorů teploty. Výhodou je možný teplotní rozsah až do 1000 °C.

7.2 Bimetalické teploměry

Bimetalické snímače jsou založeny na rozdílné teplotní roztažnosti hodnot teplotních součinitelů délkové roztažnosti dvou kovových materiálů. Tyto materiály jsou uspořádány ve tvaru pásků, které jsou navzájem podélně svařeny. Čím bude větší rozdíl u uvedených koeficientech, tím bude větší citlivost teploměru. Materiály (Al, Cu, Cr, Au, Fe, Ni, Sn, Ti, W, Invar) používané pro výrobu

bimetalických čidel mají teplotní součinitel délkové roztažnosti v rozmezí $(1,7 - 24) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. I když je volba materiálů s co největším rozdílem $\Delta\alpha$ důležitá, je nutné také přihlídnout k požadovanému provoznímu rozsahu teplot, tepelné a elektrické vodivosti a měrné tepelné kapacitě materiálů. Pro pásek s co nejmenší hodnotou koeficientu α_2 je obvykle použita slitina Invar (64 % Fe, 36 % Ni). Konstrukčně je bimetal vyráběn ve formě pásků, šroubovice nebo spirály (z důvodu větší délkové roztažnosti). Využití bimetalových snímačů v teplotním rozsahu od -100°C do 500°C je jednak ve funkci akčních členů ve dvoupolohových regulátorech teploty, bimetalických pojistek, různých teplotních kompenzací a jednak jako snímačů v teploměrech. [1]

7.3 Bimateriálová (dvojmateriálová) čidla

Při výrobě mikrosenzorů se aplikací mikroelektronické tenkovrstvé technologie vyrábějí teplotní čidla na stejném principu jako bimetalická čidla, ale jako materiál se používá kombinace kov (Al) – polovodič (Si, n-Si, p-Si, SiN_4). Použití: bimateriálový mikroventil.

7.4 Skleněné teploměry

Skleněný teploměr je dilatační teploměr založený na teplotní objemové roztažnosti kapaliny ve skle.

$$V = V_1 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T)$$

kde β (K^{-1}) je součinitel teplotní objemové roztažnosti

V_1 je počáteční objem

ΔT je rozdíl teplot

Skleněný teploměr se skládá z teploměrové baňky, měřicí kapiláry, obalové trubice a stupnicové destičky. Některé skleněné teploměry mají z důvodu ochrany před zničením při přehřátí rozšířenou kapiláru (tzv. expanzní baňku) nad nejvyšší značkou. Teplotní rozsah skleněných teploměrů je od -190°C do 600°C . Jako teploměrová kapalina se převážně používá rtuť ve vakuované kapiláře.

7.5 Kapalinové tlakové teploměry

Princip kapalinového tlakového teploměru je stejný jako u skleněných teploměrů, ale měření objemové roztažnosti se převádí na měření tlaku. Kapalinový tlakový teploměr má teploměrový systém zcela naplněn kapalinou. Nejčastější náplní je rtuť (rozsah měření teploty od -30°C do $+500^\circ\text{C}$), dále xylen (-40°C až 400°C), methylalkohol (-45°C až $+150^\circ\text{C}$) a jiné organické kapaliny. Chybu vznikající nedefinovanou teplotou spojovací kapiláry, lze odstranit kompenzací (vyrovnáním) zaslepenou druhou kapilárou bez teploměrné nádoby. [1]

7.6 Parní tlakové teploměry

Parní tlakoměr na rozdíl od kapalinového teploměru je z části naplněn kapalinou a z části její sytou párou. Konstrukce teploměru je podobná jako u kapalinového tlakového teploměru, ale stupnice je nelineární protože tlak je dán pouze tlakem nasycené páry uvnitř teploměrové nádoby, neprovádí se

kompenzace vlivu teploty okolí na spojovací kapiláru. Tlakoměrným členem je Bourdonova trubice. Parní tlakoměry se vyrábějí od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výhodou parních tlakových teploměrů ve srovnání s kapalinovými je větší citlivost, menší teploměrová nádobka, délka spojovací kapiláry do 50 m, menší teplotní časová konstanta. Nevýhodou je nelineární průběh stupnice.

7.7 Plynové tlakové teploměry

Plynový teploměr má teploměrový systém naplněn plynem. Obvykle je to dusík nebo inertní plyn (helium) pod tlakem až do $2,5 \cdot 10^6\text{ Pa}$. Princip je stejný jako u ostatních tlakových teploměrů. Výhodou plynových teploměrů je netoxická teploměrová látka. Maximální rozsah teplot je $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Spojovací kapilára může být až 100 m.

8 INDIKÁTORY TEPLOTY

Indikátory teploty slouží k přibližnému stanovení teplot těles. Teplota na základě znalosti kritické teploty tj. teploty, při níž nastává definovaná změna vzhledu indikátoru (např. žároměrky). Touto změnou může být buď tvar nebo barva indikátoru. Barevné indikátory se dále člení na vratné a nevratné.

9 ZABUDOVÁNÍ DOTYKOVÝCH TEPLOMĚŘŮ

- zajistit minimální tepelný odpor mezi snímačem a povrchem měřeného tělesa při měření teploty tuhých těles
- zajistit maximální součinitel prostupu tepla z měřeného prostředí do čidla teploměru při měření teploty v tekutinách
- zajistit minimální tepelný tok ze snímače do okolního prostředí
- nenarušit tepelné pole v místě měření

10 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLOTY

Bezdotykové měření teploty (infračervená pyrometrie) je měření povrchové teploty tělesa základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem záření vlnové délky od $0,4\text{ }\mu\text{m}$ do $25\text{ }\mu\text{m}$. Tento rozsah pokrývá oblast viditelného světla od $0,4\text{ }\mu\text{m}$ do $0,78\text{ }\mu\text{m}$. Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od $2\text{ }\mu\text{m}$ do $25\text{ }\mu\text{m}$ se označuje jako tepelné záření. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1]

Výhody bezdotykového měření:

- zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt
- možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujících se předmětech
- možnost měření rychlých změn teploty
- měření teploty z bezpečné vzdálenosti

- možnost měřit teplotu povrchu celých těles (termovize)

Nevýhody bezdotykového měření:

- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity odraženého záření
- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a objektem
- nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí

10.1 Tepelné detektory infračerveného záření

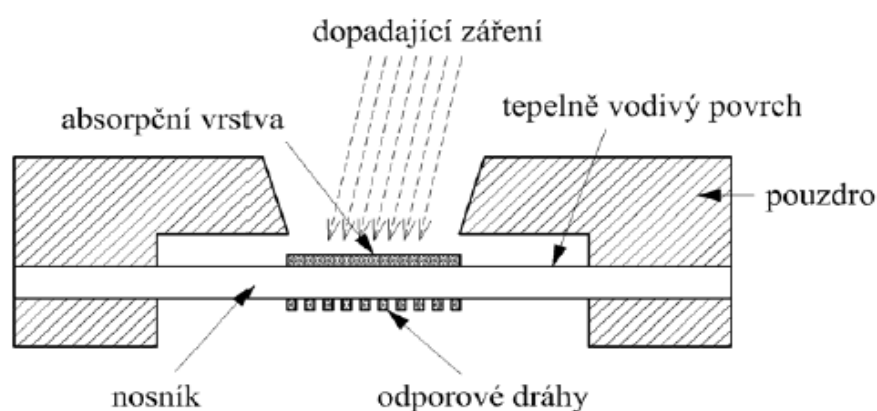
U tepelných detektorů dochází k absorpci fotonů k oteplení citlivé části a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo prostřednictvím snímačů teploty. Tepelné detektory se dělí na:

- termoelektrické
- bolometrické
- pyroelektrické

Termoelektrické detektory záření jsou sériově řazené termoelektrické články, které jsou konstruovány buď jako tenké kovové pásy tloušťky 0,03 mm nebo jako pásy zhotovené technologií tenkých vrstev nebo Si technologií.

Bolometrické detektory záření snímají oteplení detektoru teplotně závislým odporovým materiálem tj. pohlcené záření způsobí změnu teploty odporového čidla a tím i změnu jeho elektrického odporu. Používají se na bázi odporových materiálů z kysličníků MgO, MnO, NiO, TiO₂, Ti₂SeAs₂Te₃ aj.

Mikrobolometrické senzory lze uspořádat jako řádkové nebo plošné detektory. Plošné detektory se používají v termovizních kamerách v maticovém uspořádání. Tepelný stabilizátor pracuje při teplotě blízké prostředí a je založen na Peltierově jevu. Detektor je vhodný pro dlouhovlnnou oblast infračerveného záření. Výhodou tohoto detektoru je že detektivita není závislá na vlnové délce, mají rychlou časovou konstantu (1ms), používají se v termovizích.



Obr. 10 Mikrobolometrický senzor

Pyroelektrické detektory záření jsou založena na pyroelektrickém jevu, tj. změně spontánní polarizace při změně teploty. Nejčastěji se používají materiály (triglicin-sulfát, keramické materiály na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého, polyvinylfluorid). Detektor si lze představit jako kondenzátor na jehož elektrodách se při změně polarizace naindukuje náboj. Používá se v zabezpečovacích infračervených systémech.

10.2 Kvantové detektory infračerveného záření

Podstatou kvantových detektorů je fyzikální jev, při kterém při interakci dopadajících fotonů dochází ke generaci párů elektron-díra. Kvantové detektory (fotodioda) jsou polovodičové detektory (Si, Ge, PbS, Te, InSb, GaAs, CdHgTe, PbSnTe). Nevýhoda kvantových detektorů je v nutnosti chlazení čipu kvůli odstranění šumu od $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$.

10.3 Termovize

Termokamery (termální zobrazovače) jsou systémy pro plošné měření a zobrazení teploty, zobrazení a záznam přítomnosti objektů v prostoru nebo tzv. noční vidění. Tyto aplikace se také souhrnně označují jako termovize. Základním principem funkce infračervených kamer je podobně jako u viditelného světla snímání a zpracování záření dopadajícího přes optiku na infračervený snímač (detektor). Ten ho převádí na elektrický signál, následující obvody jej zesílí a analogově nebo digitálně zpracují do nějaké standardní podoby vhodné pro záznam nebo zobrazení na obrazovce či displeji. [4]

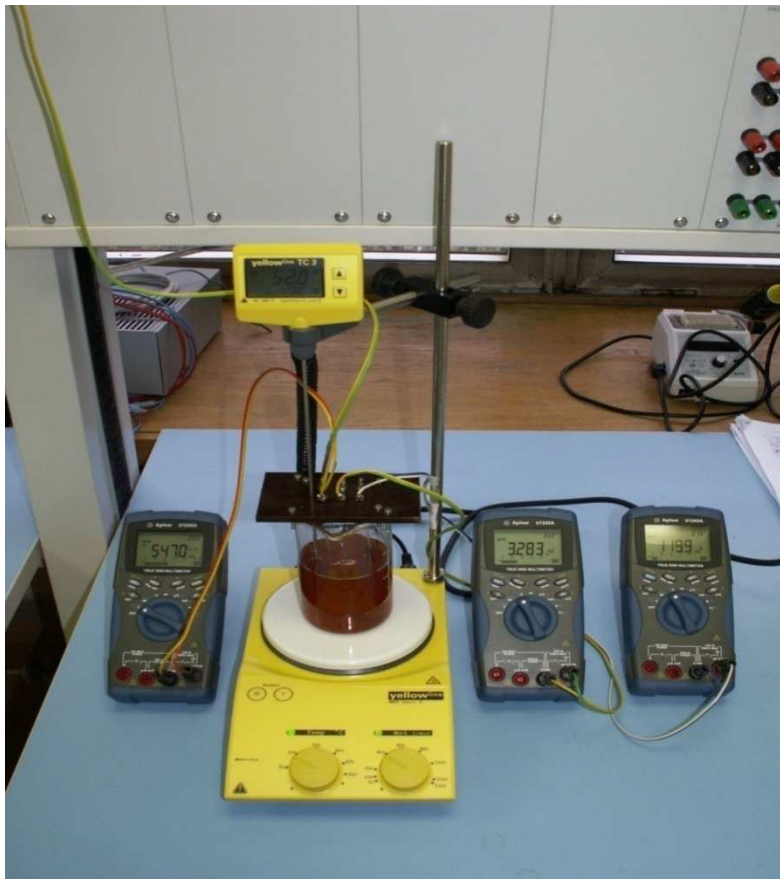
Pro termovizní kamery se používají chlazené a nechlazené maticové mikrobolometrické a kvantové detektory. Chlazení matice se provádí termoelektrickým chladičem pracujícím na principu Peltierova jevu, nebo Stirlingovým chladičem (hermeticky uzavřený chladičový systém se dvěma písty s plynným heliem, pracující na principu kompresorové mikrochladičky).



Obr. 13 Termovize a termogram motoru

11 MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH ZÁVISLOSTÍ

DIODY, TERMISTORU NTC, PT100



Obr. 14 Měření teplotních závislostí diody, termistoru NTC a platinového odporu

Úkol:

Úkolem je změřit teplotní závislost úbytku napětí na diodě, změřit teplotní závislost odporu na termistoru a platinovém čidle.

Dále je úkolem vypočítat konstanty, chyby měření a porovnat tyto výsledky s katalogovými hodnotami.

Měřené přístroje: dioda 1N4148

termistor NTC K164NK010

platinový odpor Pt100

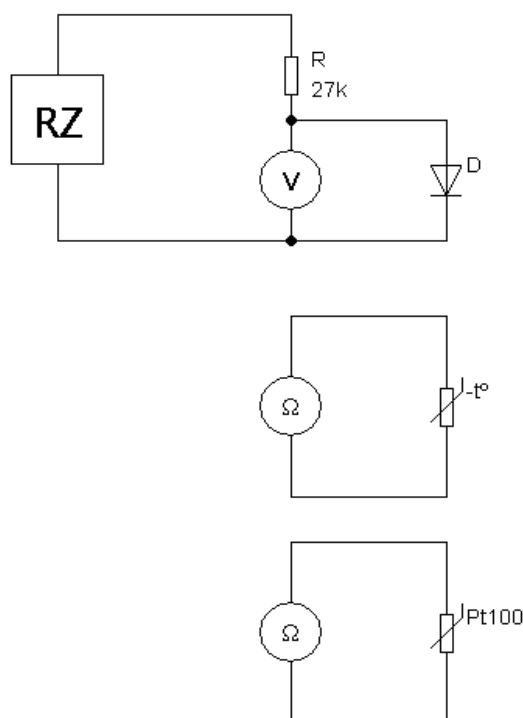
Měřicí přístroje: 3x univerzální multimetr Agilent U1242A

Pomocné přístroje: plotýnka s magnetickým míchačem MST basic C

teploměr TC3

nádoba s transformátorovým olejem

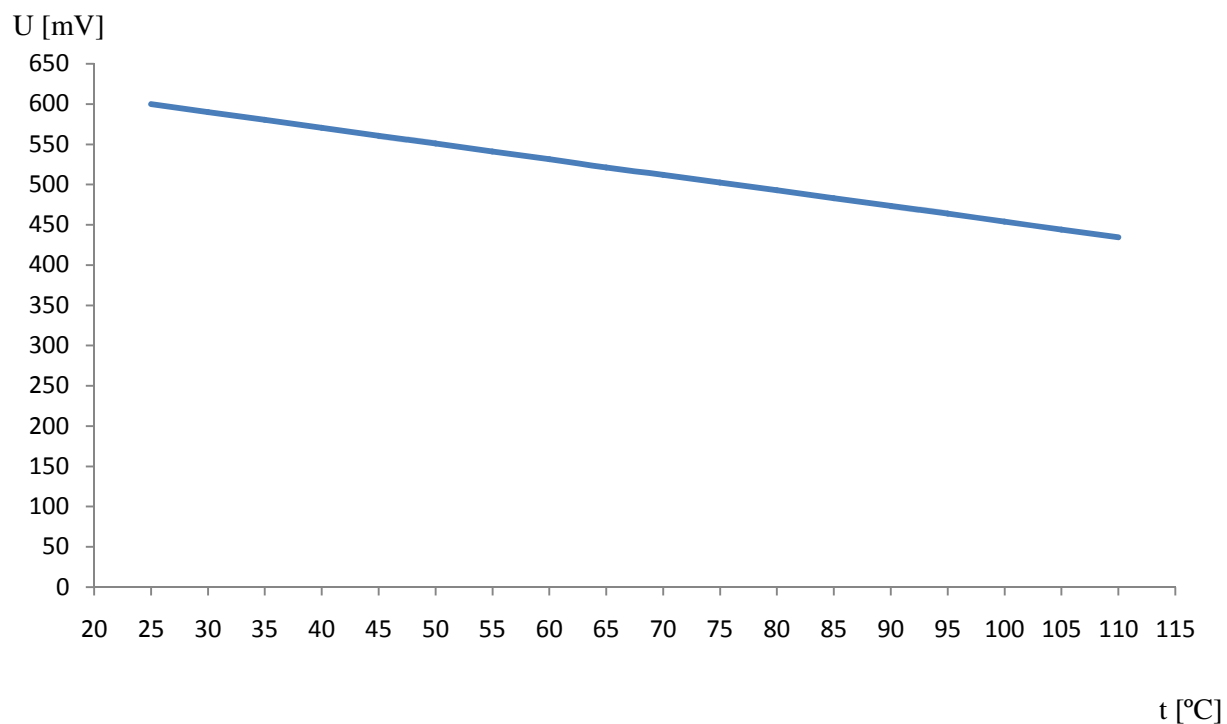
Zdroj: RZ-regulovaný zdroj napětí P230R51D



t	dioda	termistor	Pt 100
[°C]	U [mV]	R [kΩ]	R [Ω]
25	600,0	10,240	110,0
30	590,0	8,140	111,9
35	580,3	6,621	113,8
40	570,4	5,360	115,7
45	560,6	4,350	117,5
50	551,0	3,564	119,4
55	541,2	2,927	121,1
60	531,3	2,405	123,0
65	521,0	1,950	125,2
70	512,1	1,644	126,9
75	502,5	1,372	128,5
80	492,9	1,152	130,4
85	483,1	0,967	132,4
90	473,5	0,820	134,2
95	464,0	0,699	136,1
100	453,9	0,592	138,1
105	444,2	0,508	139,9
110	434,3	0,436	141,7

Obr. 15 Schéma a tabulka naměřených hodnot

DIODA 1N4148



Obr. 16 Závislost úbytku napětí diody 1N4148 na teplotě

citlivost diody na 1 °C

$$\Delta t = 110 - 25 = 85 \text{ °C}$$

$$\Delta U = 434,3 - 600 = -165,7 \text{ mV}$$

$$\text{Citlivost } K = \Delta U : \Delta t = -165,7 : 85 = -1,95 \text{ mV/°C}$$

Katalogové hodnoty diody 1N4148 [5]

proud v propustném směru $I_F = 0,2 \text{ A}$

průrazné závěrné napětí $U_R = 75 \text{ V}$

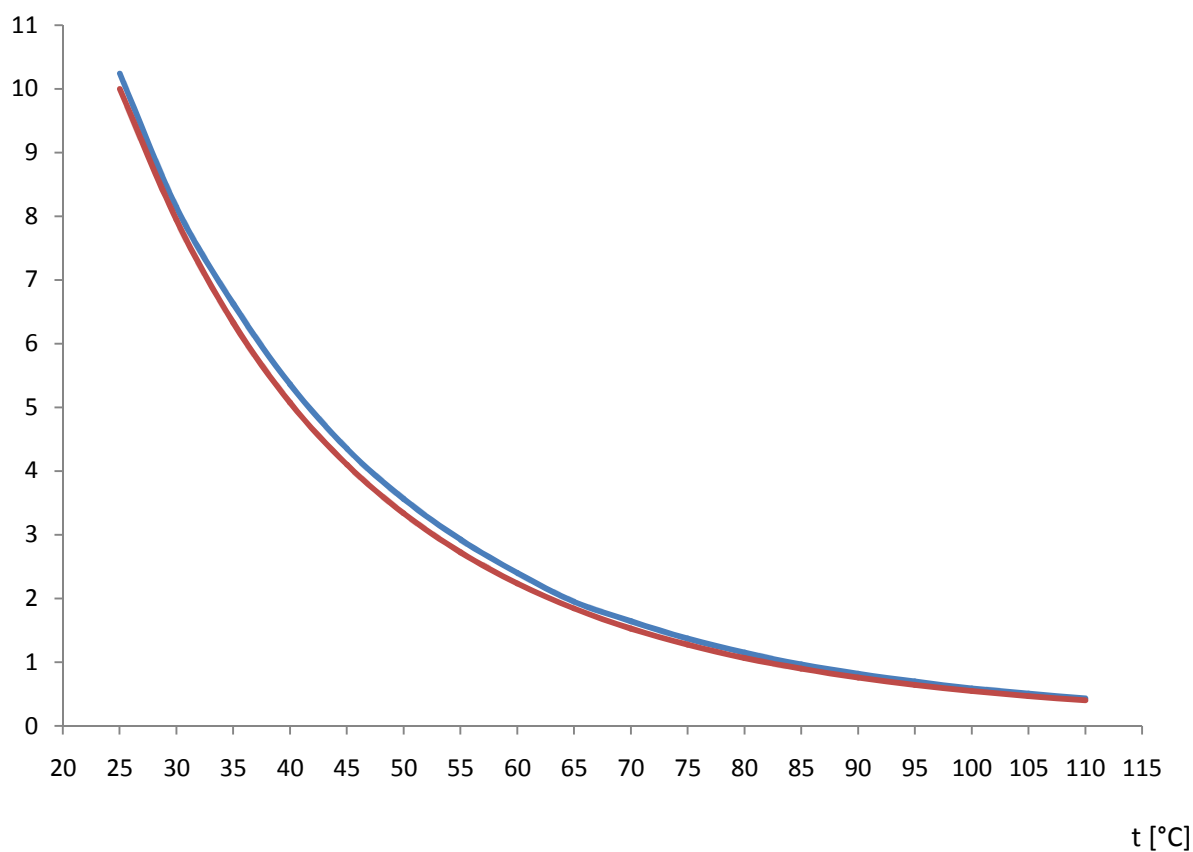
mezní frekvence $f_m = 125 \text{ MHz}$

maximální teplota přechodu 200 °C

skladovací teplota -65 až 200 °C

TERMISTOR K164NK010

R [kΩ]



— změřená charakteristika

— skutečná charakteristika (katalogová)

Obr. 17 Závislost odporu termistoru K164NK010 na teplotě

1. příklad výpočtu pro okolí pracovní teploty $t_1 = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Výpočet teplotní konstanty B

$$T_1 = t_1 + 273,15 = 25 + 273,15 = 298,15\text{K}$$

$$T_2 = t_2 + 273,15 = 85 + 273,15 = 358,15\text{K}$$

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{298,15 \cdot 358,15}{358,15 - 298,15} \cdot \ln \frac{10240}{967} = 4200\text{K}$$

$$T_1 = t_1 + 273,15 = 25 + 273,15 = 298,15\text{K}$$

$$T_2 = t_2 + 273,15 = 30 + 273,15 = 303,15\text{K}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 303,15 - 298,15 = 5\text{K}$$

Teplotní součinitel odporu termistoru je

$$\alpha_1 = -\frac{B}{T_1^2} = -\frac{4200}{298,15^2} = -0,04725$$

Závislost odporu termistoru na teplotě je dána vztahem

$$R_A = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = R_1 \cdot \left(1 - \frac{4200}{T_1^2} \cdot \Delta T\right) = 10240 \cdot \left(1 - \frac{4200}{298,15^2} \cdot 5\right) = 7820,92\Omega$$

2. příklad výpočtu pro okolí pracovní teploty $t_2 = 110\text{ }^\circ\text{C}$

$$T_1 = t_1 + 273,15 = 110 + 273,15 = 383,15\text{K}$$

$$T_2 = t_2 + 273,15 = 105 + 273,15 = 378,15\text{K}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 378,15 - 383,15 = -5\text{K}$$

Teplotní součinitel odporu termistoru je

$$\alpha_2 = -\frac{B}{T_1^2} = -\frac{4200}{383,15^2} = -0,02861$$

Závislost odporu termistoru na teplotě je dána vztahem

$$R_B = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = R_1 \cdot \left(1 - \frac{4200}{T_1^2} \cdot \Delta T\right) = 436 \cdot \left(1 - \frac{4200}{383,15^2} \cdot (-5)\right) = 498,37\Omega$$

3. příklad výpočtu pro 80 °C

$$T_1 = t_1 + 273,15 = 25 + 273,15 = 298,15 K$$

$$T_2 = t_2 + 273,15 = 110 + 273,15 = 383,15 K$$

Výpočet konstanty A

$$A = R \cdot e^{\frac{B}{T}} = 10240 \cdot e^{\frac{4200}{298,15}} = 0,00781 \Omega$$

$$T = t + 273,15 = 80 + 273,15 = 353,15 K$$

$$R = A \cdot e^{\frac{B}{T}} = 0,00781 \cdot e^{\frac{4200}{353,15}} = 1141,55 \Omega$$

4. příklad výpočtu pro 100 °C

$$T_{25} = t_{25} + 273,15 = 25 + 273,15 = 298,15 K$$

$$T = t + 273,15 = 100 + 273,15 = 373,15 K$$

$$R = R_{25} \cdot e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}} \right)} = 10240 \cdot e^{4200 \left(\frac{1}{373,15} - \frac{1}{298,15} \right)} = 603,48 \Omega$$

Tabulka absolutních chyb a relativních chyb termistoru

t	R	R _S	Δ	δ
[°C]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[%]
25	10,240	10,000	0,240	2,400
30	8,140	7,9420	0,198	2,493
35	6,621	6,3268	0,294	4,647
40	5,360	5,0740	0,286	5,637
45	4,350	4,1026	0,247	6,021
50	3,564	3,3363	0,228	6,834
55	2,927	2,7243	0,203	7,451
60	2,405	2,2370	0,196	8,762
65	1,950	1,8459	0,104	5,634
70	1,644	1,5305	0,114	7,449
75	1,372	1,2755	0,097	7,605
80	1,152	1,0677	0,084	7,867
85	0,967	0,89928	0,067	7,450
90	0,820	0,76068	0,059	7,756
95	0,699	0,64524	0,054	8,369
100	0,592	0,54941	0,043	7,827
105	0,508	0,47003	0,038	8,085
110	0,436	0,40358	0,032	7,929

Absolutní chyba

$$\Delta = R - R_s = 2,45 - 2,2370 = 0,996 \text{ k}\Omega$$

Relativní chyba

$$\delta = \frac{\Delta}{R_s} \cdot 100 = \frac{0,996}{2,2370} \cdot 100 = 8,76\%$$

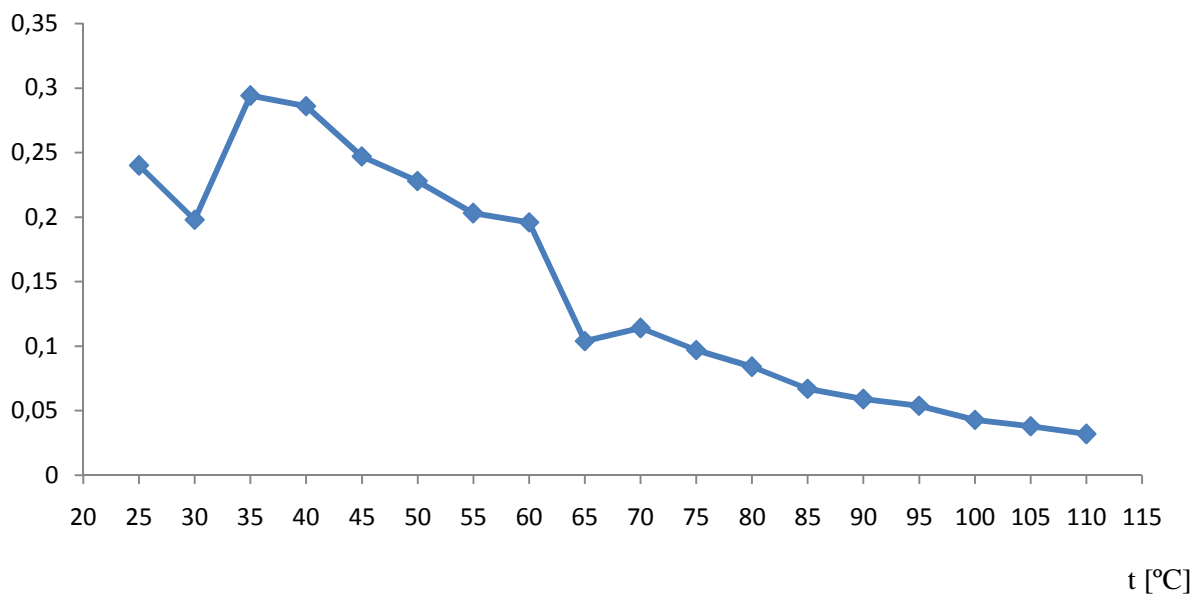
R_s skutečná hodnota odporu [$\text{k}\Omega$]

R naměřená hodnota odporu [$\text{k}\Omega$]

Δ absolutní chyba [$\text{k}\Omega$]

δ relativní chyba [%]

$+\Delta$ [$\text{k}\Omega$]



Obr. 18 Křivka absolutních chyb termistoru

Katalogové hodnoty termistoru [6]

tolerance termistoru $\pm 20\%$

jmenovitý odpor $10 \text{ k}\Omega$ při 25°C

teplotní rozsah -55 až 125°C

maximální napětí 250 V

rozsah hodnot $6,8 \text{ }\Omega$ až $680 \text{ k}\Omega$

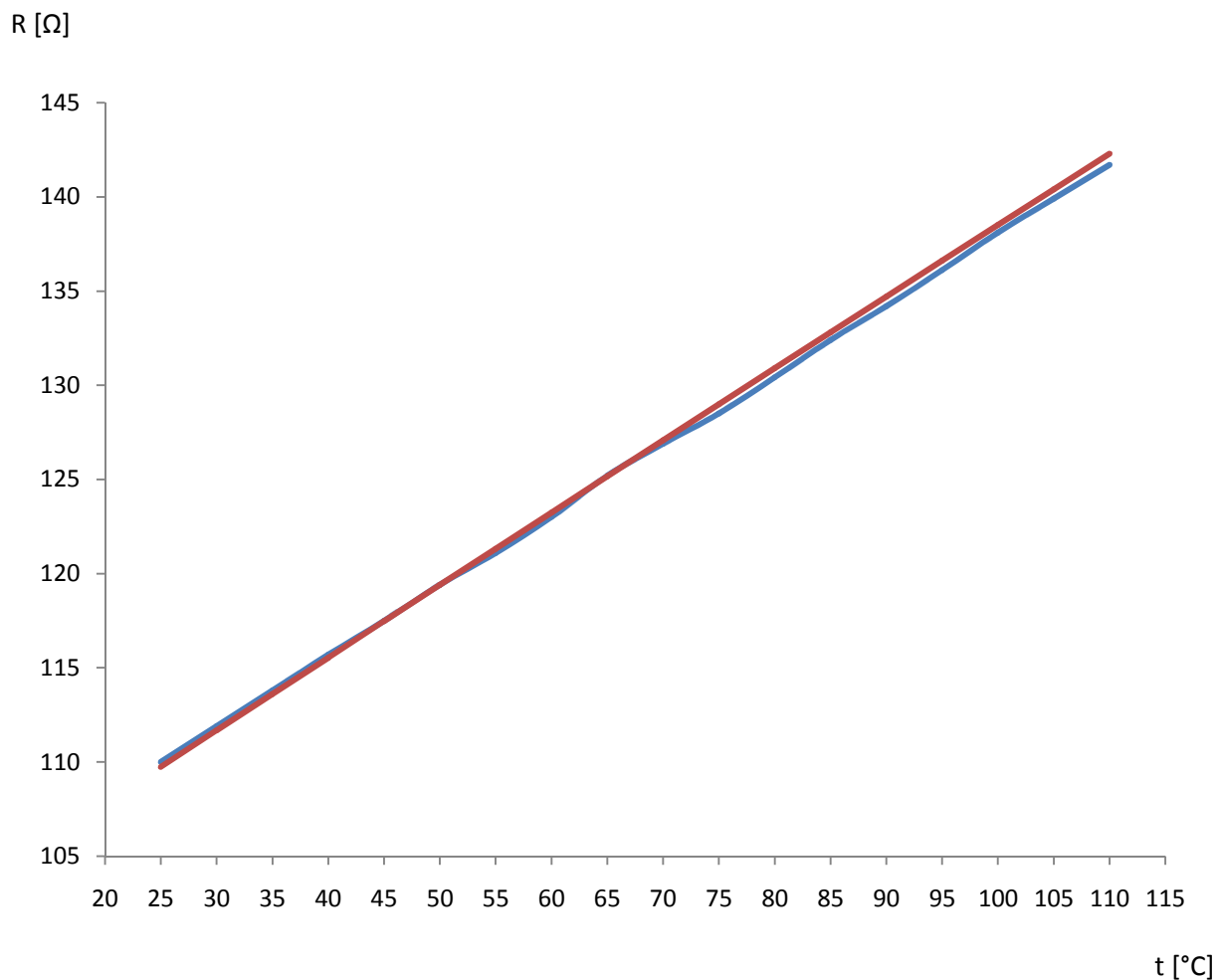
tepelná kapacita 150 mJ/K

jmenovité zatížení $0,45 \text{ W}$

Měřením bylo zjištěno že maximální chyba termistoru v rozsahu 25°C až 110°C je $+8,76\%$.

Tolerance termistoru je $\pm 20\%$

ODPOROVÝ PLATINOVÝ SNÍMAČ TEPLOTY Pt100



— změřená charakteristika

— skutečná charakteristika (katalogová)

Obr. 19 Závislost odporu čidla Pt100 na teplotě

Teplotní součinitel odporu je

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_1 \cdot \Delta t} = \frac{111,9 - 110}{110 \cdot (30 - 25)} = 0,00345 K^{-1}$$

tabulková hodnota je $\alpha = 0,0039 K^{-1}$ při 0°C

Nepřesnost je dána mírnou nelineární závislostí, ale pro menší rozdíly teplot lze použít tento vztah.

Závislost odporu Pt100 na teplotě je dána vztahem

$$R = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Příklad výpočtu

$$t_1 = 30\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_1 = t_1 + 273,15 = 30 + 273,15 = 303,15\text{ K}$$

$$t_2 = 80\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_2 = t_2 + 273,15 = 80 + 273,15 = 353,15\text{ K}$$

$$R_1 = 111,9\text{ }\Omega$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 353,15 - 303,15 = 50\text{ K}$$

$$R = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 111,9(1 + 0,0035 \cdot 50) = 131,48\Omega$$

Tabulka absolutních chyb a relativních chyb Pt100

t	R	R _s	Δ	δ
[°C]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[%]
25	110,0	109,735	0,265	0,241
30	111,9	111,673	0,227	0,203
35	113,8	113,608	0,192	0,169
40	115,7	115,541	0,159	0,138
45	117,5	117,470	0,030	0,026
50	119,4	119,397	0,003	0,003
55	121,1	121,321	-0,221	-0,182
60	123,0	123,242	-0,242	-0,196
65	125,2	125,160	-0,040	-0,032
70	126,9	127,075	-0,175	-0,138
75	128,5	128,987	-0,487	-0,378
80	130,4	130,897	-0,497	-0,380
85	132,4	132,803	-0,403	-0,303
90	134,2	134,707	-0,507	-0,376
95	136,1	136,608	-0,508	-0,372
100	138,1	138,506	-0,406	-0,293
105	139,9	140,400	-0,500	-0,356
110	141,7	142,293	-0,593	-0,417

Absolutní chyba

$$\Delta = R - R_s = 141,7 - 142,293 = -0,593\Omega$$

Relativní chyba

$$\delta = \frac{\Delta}{R_s} \cdot 100 = \frac{-0,593}{142,293} \cdot 100 = -0,417\%$$

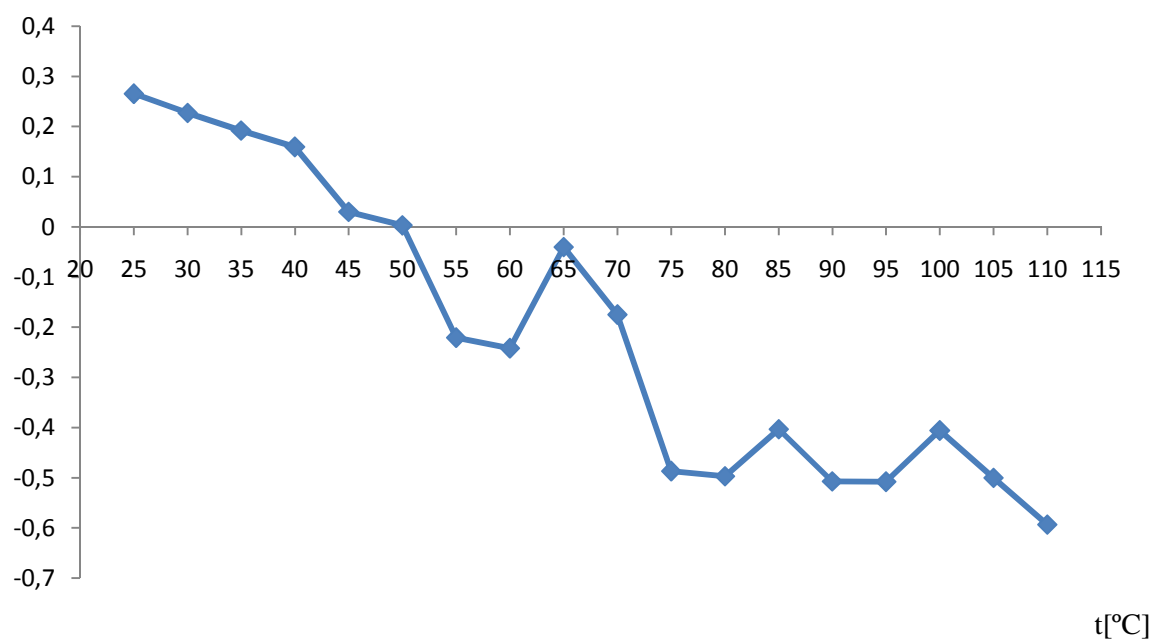
R_s skutečná hodnota odporu [Ω]

R naměřená hodnota odporu [Ω]

Δ absolutní chyba [Ω]

δ relativní chyba [%]

$+\Delta [\Omega]$



Obr. 20 Křivka absolutních chyb Pt100

Tolerance oproti teplotě Pt100

t	R	Třída přesnosti 1/3B		Třída přesnosti A		Třída přesnosti B		Třída přesnosti 2B	
[°C]	[Ω]	[°C]	[Ω]	[°C]	[Ω]	[°C]	[Ω]	[°C]	[Ω]
-100	60,26	±0,27	±0,10	±0,35	±0,14	±0,8	±0,32	±1,4	±0,57
0	100,00	±0,10	±0,04	±0,15	±0,06	±0,3	±0,12	±0,6	±0,25
100	138,51	±0,27	±0,10	±0,35	±0,14	±0,8	±0,30	±1,4	±0,53
200	175,86	±0,44	±0,16	±0,55	±0,20	±1,3	±0,48	±2,2	±0,80
300	212,05	±0,61	±0,21	±0,75	±0,27	±1,8	±0,64	±3,0	±1,10

Pro 100 °C platí

$$\Delta = R - R_s = 138,1 - 138,506 = -0,41\Omega$$

Podle měření a tabulky bylo zjištěno že třída přesnosti měřeného platinového odporu je 2B.

12 ZÁVĚR

Úkolem bakalářské práce bylo navrhnout laboratorní úlohu, která přiblíží vlastnosti elektrických teploměrů pomocí závislostí odporů a úbytku napětí na teplotě. Byly použity tři snímače teploty dioda, termistor a platinový odpor. U diody jsem zaznamenával úbytek napětí měřený na diodě, na termistoru a platinovém odporu jsem zaznamenával měnící se odpor v závislosti na zahřívání. V této úloze byl použit transformátorový olej kvůli možnosti zahřívání do vyšších teplot než u vody, kde by došlo k varu vody a dále by se nedalo měřit, protože by se vypařila. Pro zvýšení efektivity a lepšího proudění v oleji byl použit magnetický míchač s plotýnkou.

Dioda 1N4148 je polovodičová součástka s PN přechodem. Využívá se zde teplotní závislosti PN přechodu v propustném směru. Se zvyšující se teplotou klesá lineárně napětí na diodě. Výhoda diody je její lineárnost (měření napětí na diodě), nevýhoda diody má malé změny napětí při změně teploty. Tato dioda se využívá k usměrňování proudu, proto katalogová hodnota chyby není uvedena. Její citlivost je $K = -1,95 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Termistor NTC K164NK010 je polovodičová součástka bez přechodu PN, je vyroben z oxidu kovů. Termistory patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v elektrotechnice. Se zvyšující teplotou odpor klesá. Výhoda termistoru- velké změny odporu při změně teploty (velká citlivost), nevýhoda termistoru-nelineární charakteristika (má hyperbolický průběh), tím pádem je potřeba složitější vyhodnocovací obvod. Teplotní součinitel odporu se pohybuje od $\alpha_1 = -0,04725 \text{ K}^{-1}$ do $\alpha_2 = -0,02861 \text{ K}^{-1}$. Měřením bylo zjištěno že maximální chyba termistoru v rozsahu 25°C až 110°C je $+8,76 \%$. Katalogová hodnota tolerance termistoru je $\pm 20 \%$. Matematická závislost odporu na

teplotě je dána vztahem $R = 10240 \cdot e^{4200 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right)}$.

Pt100 je odporový snímač, který je vyroben z platiny. Odpor snímače je lineárně přímo úměrný teplotě. Výhoda snímače-lineárnost (u menších rozdílů teploty), časová stálost, použití pro velký rozsah teplot, nevýhoda snímače-menší citlivost $K = 0,4 \Omega/^\circ\text{C}$ oproti termistoru. Měřením a porovnáním s tabulkou bylo zjištěno že třída přesnosti měřeného platinového odporu Pt100 je 2B a vypočtená hodnota teplotního součinitele odporu α je $0,00345 \text{ K}^{-1}$. Matematická závislost odporu na teplotě je dána vztahem $R = R_1 \cdot (1 + 0,00345 \cdot \Delta T)$.

V současné době se stále častěji využívá úprava výstupního signálu přímo v hlavici snímače, neboť přenos nízkonapěťových signálů trpí rušením. Proto je měřicí řetězec koncipován tak, že na výstupu je buď zesílený analogový proudový signál (4 až 20 mA), nebo číslicový signál podle vybrané průmyslové komunikační sběrnice (např. HART, CAN, Profibus).

13 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Marcel Kreidl—Měření teploty-senzory a měřící obvody, 1. vydání, BEN technická literatura, Praha, 2004-2005
- [2] Polovodičové odporové senzory teploty [online]. [citováno 28. ledna 2009]. Dostupné z WWW:
<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1141-Mereni-teploty---polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [3] Převod stupňů [online]. [citováno 28. ledna 2009]. Dostupné z WWW:
<http://www.stupne.cz/prevod-stupnu-fahrenheitova-teplotni-stupnice/>
- [4] Infračervené kvantové detektory a termokamery - úvod[online]. [citováno 28. ledna 2009] Dostupné z WWW:
<http://automatizace.hw.cz/infracervene-kvantove-detektory-termokamery-uvod>
- [5] Dokumentace diody 1N4148 [online]. [citováno 28. ledna 2009] Dostupné z WWW:
http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/917/917-001/dsh.917-001.1.pdf
- [6] Dokumentace termistoru K164NK010 [online]. [citováno 28. ledna 2009] Dostupné z WWW:
http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/118/118-010/kgm.118-010.1.pdf